УДК 621.396:681.3.07

О.О. Дробахин[1], А.В. Доронин[2]
[1]Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск, Украина
drobakhinj@mail.ru
[2]Институт технической механики, НКА и НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина
doronin_al@mail.ru

Применение нейросетевых технологий для повышения достоверности оценок параметров перемещения неплоских элементов конструкций

С целью получения достоверных значений параметров перемещения объектов с неплоской поверхностью с помощью интерференционного СВЧ-метода на основе трехзондовых измерителей использованы нейросетевые технологии. На базе данного метода была поставлена серия реальных экспериментов. Квадратичность характеристик детекторов обеспечивалась применением калибровки с использованием разработанной математической модели нейронной сети. Применение интерференционного метода СВЧ-измерений в сочетании с нейросетевыми технологиями позволило определять параметры перемещения контролируемого объекта с высокой точностью.

Введение

Возникновение и стремительное развитие современных средств обработки информации делает актуальным вопрос об их применении для решения актуальных научно-технических задач, а также обеспечение повышения таких важных факторов, как надежность и достоверность. Одной из задач является разработка средств измерения параметров механических перемещений и вибраций неплоских объектов. С точки зрения безынерционности и бесконтактности измерений микроволновые методы обладают неоспоримым преимуществом, а в условиях термических нагрузок объекта либо пребывания его в агрессивной среде являются решающим обстоятельством в пользу выбора микроволновых методов. Практическое применение существующих методов требует повышения точности оценок местоположения контролируемого объекта, которое в состоянии обеспечить применение нейросетевых технологий [1].

Наиболее популярным из микроволновых методов измерения параметров движения является интерференционный метод [2-4]. В его основе лежит анализ суперпозиции электромагнитных волн, распространяющихся от генератора и отраженных от исследуемого объекта, что приводит к образованию стоячей волны в измерительном волноводном тракте. С помощью детектора регистрируется электрическое поле этой волны, модулированное перемещениями контролируемого элемента конструкции. На базе данного метода были проведены экспериментальные исследования.

Цель исследований. Показать актуальность применения нейросетевых технологий в сочетании с интерференционным СВЧ-методом для контроля параметров перемещений неплоских элементов конструкций.

Постановка эксперимента

Информация о расстоянии до отражающего элемента конструкции заключена в фазе комплексного коэффициента отражения, поэтому необходимо рассмотреть многозондовый измеритель комплексного коэффициента отражения, в частности трехзондовый. Схема экспериментальной установки была следующей (рис. 1): от генератора 1 через вентиль 2 СВЧ-сигнал частоты 10 ГГц поступает на вход измерительной волноводной секции 3 с тремя зондами, соединенными с детекторами, измерительная секция непосредственно соединена с приемо-передающим рупором 4. Излучаемая волна падает на отражатель в виде металлической пластины 5 (имеющей определенную кривизну поверхности), которая перемещалась вдоль продольной оси, соответственно отраженный сигнал поступает в антенну и измерительную секцию, в которой формируется стоячая волна. Начальное расстояние от плоскости апертуры антенны до поверхности пластины составляло 100 мм. Контролируемый объект (металлическая пластина 5) перемещался свободно – без использования направляющей. В ходе эксперимента были использованы две пластины, имеющие идентичные размеры 250 × 300 мм, но различные радиусы кривизны 600 мм и 1720 мм. Антенна представляла собой пирамидальный рупор длиной 200 мм и размерами апертуры 95 × 95 мм. Сечение волновода для всего СВЧ тракта составляло 23 × 10 мм. Данные с детекторов измерительной секции фиксировались через каждые 3 мм перемещения отражающей поверхности. Для получения более полного представления о преимуществах и недостатках применения интерференционного метода измерений для неплоских объектов были проведены две серии экспериментов. В первой серии экспериментов отражающая поверхность располагалась вогнутой частью к апертуре антенны (рис. 1, отражающая пластина 5 изображена непрерывными линиями), а во второй – выпуклой (рис. 1, отражающая пластина 5 изображена пунктиром).

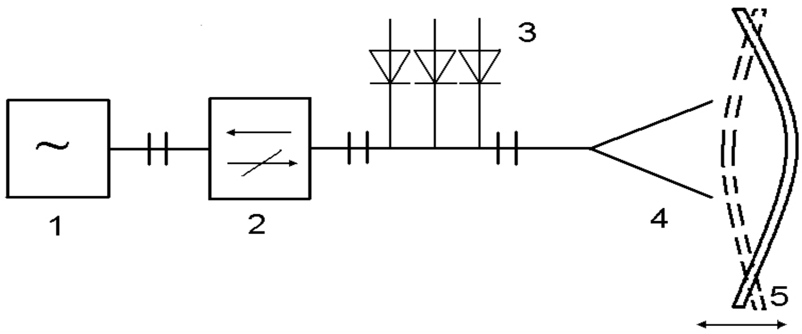


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Анализ работы установки

Проанализируем работу установки для случая, когда зонды с детекторами расположены в волноводе эквидистантно на расстоянии $\Lambda/8$ друг от друга (Λ – длина волны в волноводе) и при соблюдении квадратичности характеристик детекторов. В этом случае полученный с детекторов выходной сигнал P_m имеет вид:

$$P_m = k_m \left| \exp\left(-j \frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\Lambda}{8}(m-1) \right) + \dot{\Gamma} \exp\left(j \frac{2\pi}{\Lambda} \frac{\Lambda}{8}(m-1) \right) \right|^2 , \qquad (1)$$

где $m = 1, 2, 3$. При этом сигналы $\exp\left(-j\frac{2\pi}{\Lambda}\frac{\Lambda}{8}(m-1)\right)$ имеют смысл опорных, а сигналы $\dot{\Gamma}\exp\left(j\frac{2\pi}{\Lambda}\frac{\Lambda}{8}(m-1)\right)$ содержат информацию об исследуемом комплексном коэффициенте отражения $\dot{\Gamma}$. Коэффициенты пропорциональности k_m для каждого из детекторов устраняются из окончательных выражений путем деления результатов измерений (1) на результат измерений в режиме бегущей волны, то есть при согласованной нагрузке. Таким образом, имеем систему трех нормированных величин p_i:

$$p_1 = \left|1+\dot{\Gamma}\right|^2;\ p_2 = \left|e^{-j\frac{\pi}{2}}+\dot{\Gamma}\right|^2;\ p_3 = \left|e^{-j\pi}+\dot{\Gamma}\right|^2. \tag{2}$$

Далее согласно методу голографии с тремя опорными сигналами [5] необходимо сформировать величины $p_1 - p_2$ и $p_1 - p_3$, при этом процедура вычитания сигнала при согласованной нагрузке из каждого из p_m может быть опущена. В результате получим систему линейных алгебраических уравнений относительно действительной (Γ') и мнимой части (Γ'') комплексного коэффициента отражения:

$$\begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 2 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Gamma' \\ \Gamma'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - p_2 \\ p_1 - p_3 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Число обусловленности матрицы правых частей системы равно 2,618, что незначительно хуже числа обусловленности для 4-зондового измерителя, которое равно 1. Следует отметить, что число обусловленности не зависит от значений коэффициента отражения, в то время как решение системы квадратных уравнений классическим методом приобретает большие погрешности при коэффициенте отражения, приближающемся к единице [6]. Решение системы (3) может быть записано в явном виде:

$$\Gamma' = 0{,}25(p_1 - p_3);\quad \Gamma'' = 0{,}25(p_1 - 2p_2 + p_3). \tag{4}$$

Интересно отметить, что первое выражение в (4) пропорционально первой разности, а второе – второй разности нормированных значений детекторов. На самом деле проводится измерение суммарного коэффициента отражения излучающей системы и внесенного коэффициента отражения исследуемого объекта, поэтому необходимо дополнительно провести измерения коэффициента отражения антенны при излучении в свободное пространство и вычесть его из результатов измерений при наличии исследуемого объекта. Именно после вычитания фаза φ полученного комплексного коэффициента отражения $\Gamma = |\Gamma|\exp(j\varphi)$ связана линейным соотношением с расстоянием до отражающего объекта, что и позволяет определить последнее.

Выражения (4) получены в предположении квадратичности характеристик детекторов, в действительности детекторы не имеют квадратичной характеристики, поэтому эффективность работы указанного класса измерителей непосредственно зависит от проведения калибровки [7].

С этой целью была создана математическая модель трехслойной нейронной сети с обратной связью. Первый слой имел 1 нейрон, что определялось входным отсчетом диодного датчика мощности для конкретного положения x зонда в измерительной линии. Третий слой имел 1 нейрон, что соответствовало выходному значе-

нию нормированной величины $100\sin^2(2\pi x/\Lambda)$, где Λ – длина волны в волноводе измерительной линии. Первый и второй слои (входной и скрытый) нейронной сети имели сигмоидальную функцию (S – функция) активации слоёв нейронов, третий (выходной) слой – линейную.

Была проведена серия тренировок математической модели нейронной сети с применением ряда алгоритмов (Левенберга – Маркварда, сопряженных градиентов, Флетчера – Поуэлла, классического алгоритма обратного распространения, алгоритма обратного распространения ошибки с использованием метода секущих, алгоритма масштабируемых сопряженных градиентов, алгоритма Полака – Рибера) и различным числом нейронов во внутреннем слое (от 8 до 12 с шагом 1 и от 10 до 80 с шагом 10). Следует отметить, что для каждого выбранного числа нейронов во внутреннем слое было предпринято по крайней мере 3 попытки подбора весов. Качество сформированной сети проверялось путем предъявления набора входных данных.

Наилучшие результаты показала модель нейронной сети, имеющая 10 нейронов в скрытом слое, при этом был использован алгоритм масштабируемых сопряженных градиентов. Следует отметить, что число нейронов в скрытом слое превышало расчетные значения. Линейная модель нейронной сети также не показала хороших результатов, несмотря на явный линейный характер связи зависимости входных данных и целевого вектора нормированных данных. Точность обучения составляла 10^{-4}.

Полученные модели характеристик детекторов позволили более точно определять комплексный коэффициент отражения, в особенности его модуль. Это важно для корректного вычитания коэффициента отражения антенны из результатов измерений.

В результате обработки экспериментальных данных были получены зависимости действительной части комплексного коэффициента отражения для пластин, расположенных вогнутой (рис. 2) и выпуклой (рис. 3) частями к апертуре антенны.

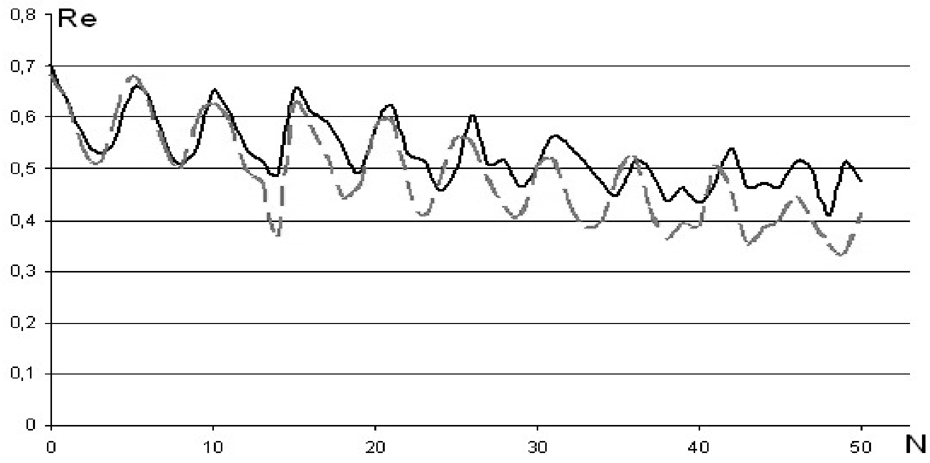


Рисунок 2 – Действительная часть коэффициента отражения для вогнутых пластин

Оси абсцисс соответствуют номера измерений, которые связаны с местоположением пластины, а оси ординат – действительные значения комплексного коэффициента отражения для пластин, расположенных вогнутой частью к апертуре антенны.

На рис. 2 и рис. 3 непрерывной кривой соответствует зависимость действительной части комплексного коэффициента отражения для пластины с большей кривизной (меньшим радиусом), а пунктирная кривая – меньшей кривизной (большим радиусом).

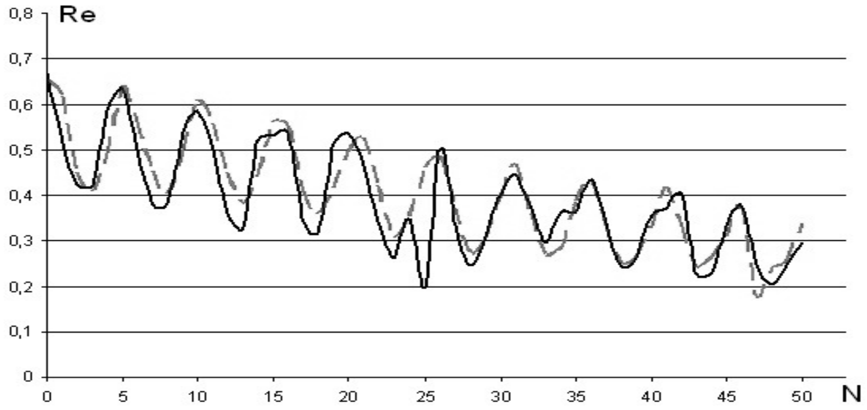


Рисунок 3 – Действительная часть коэффициента отражения для выпуклых пластин

Интересно отметить, что углы наклона зависимости действительной части комплексного коэффициента отражения для исследуемых пластин, обращенных вогнутой частью к апертуре антенны, отличны друг от друга (рис. 2). Очевидно, что радиус кривизны вогнутой части контролируемого объекта заключен в угле наклона зависимости действительной части комплексного коэффициента отражения.

Для пластин, обращенных выпуклой частью к апертуре антенны (рис. 3), такой эффект не наблюдается. Это происходит вследствие рассеивания электромагнитного излучения от исследуемой поверхности вследствие неплоского характера фронта реально излучаемой волны. Данные зависимости характерны также для плоских объектов, расположенных перпендикулярно оси излучателя, с большим уровнем шума в измеренном сигнале.

В результате вычислений приведенным выше методом оценок расстояний были получены данные, анализ которых выявил присутствие положительной систематической компоненты, величина которой была практически одинаковой для всех полученных значений относительного перемещения поверхности контролируемого объекта (как для пластин, обращенных вогнутой, так и для пластин, обращенных выпуклой стороной к апертуре антенны). Результаты после устранения систематической компоненты приведены ниже (рис. 4 и рис. 5).

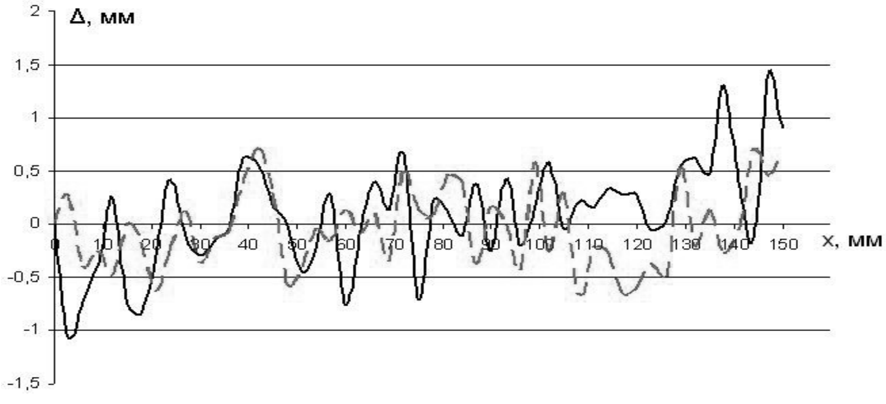


Рисунок 4 – Абсолютная погрешность оценки местоположения для вогнутых пластин

На рис. 4 и рис. 5 по оси абсцисс отложены значения относительного перемещения отражающей поверхности контролируемого элемента конструкций (обращенной, соответственно, вогнутой и выпуклой частями к апертуре антенны) от начального положения, а по оси ординат – абсолютные погрешности оценок по сравнению с установленным значением расстояния.

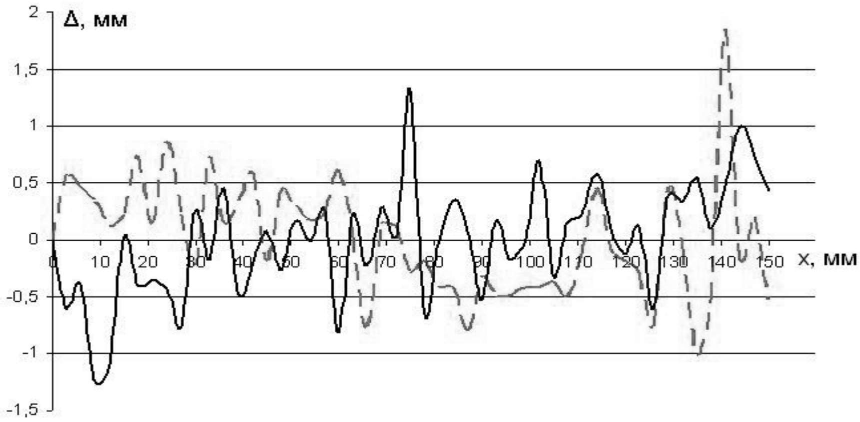


Рисунок 5 – Абсолютная погрешность оценки местоположения для выпуклых пластин

На рис. 4 и рис. 5 непрерывной кривой показана зависимость значений абсолютной погрешности оценивания расстояния, полученная в соответствии с приведенным выше методом вычислений для пластины с большей кривизной (меньший радиус), а пунктирной кривой – зависимость значений абсолютной погрешности оценивания расстояния для пластины с меньшей кривизной (больший радиус).

В табл. 1 приведены результаты исследований, средние и максимальные значения абсолютной погрешности вычислений.

Таблица 1

Положение пластины к апертуре антенны	Вогнутой частью к апертуре		Выпуклой частью к апертуре	
Радиус кривизны, мм	600	1720	600	1720
Максимальная погрешность, мм	1,41	0,71	1,85	1,33
Средняя погрешность, мм	0,39	0,32	0,4	0,38

Интересно отметить, что наиболее высокий уровень погрешности оценок расстояний наблюдается для исследуемых объектов, обращенных вогнутой частью к апертуре антенны (рис. 1, пластина 5 обозначена непрерывными линиями). А именно в непосредственной близости от крайних положений перемещения элементов конструкций. Высокий уровень абсолютной погрешности оценок в зоне начального положения объясняется наличием эффектов ближней зоны излучения данного излучателя. Погрешности, возникающие вблизи конечного положения пластины, появляются как следствие наложения дополнительного излучения (переотражений), отраженного от загнутых краев отражающей поверхности, что влечет за собой смещение значения фазы комплексного коэффициента отражения относительно её теоретически предполагаемого значения.

В случае определения оценок расстояния для поверхностей, расположенных выпуклой стороной к апертуре антенны (рис. 1, пластина 5 обозначена пунктиром), происходят частичные потери отраженного излучения, как следствие его отражения в пространство от выгнутых краев исследуемой пластины. Это явление хорошо заметно с увеличением кривизны элемента конструкции и его постепенным отдалением от антенны.

Необходимо учесть и тот факт, что контролируемый объект не был жёстко зафиксирован, и не всегда ось отражающей поверхности располагалась строго соосно с осью антенны (максимальное отклонение не превышало 7°), а значит, происходили потери части отраженного электромагнитного излучения, тем самым условия эксперимента были приближены к реальным условиям перемещения элементов конструкций. Следовательно, можно ожидать примерно таких же погрешностей при промышленном использовании данного метода бесконтактных измерений.

Выводы

Проведенные исследования показали перспективность комбинированного применения интерференционного метода СВЧ-измерений и нейросетевых технологий для обработки данных измерений контролируемых неплоских (как вогнутых, так и выпуклых) элементов конструкций. При этом в качестве измерителя был использован трехзондовый волноводный СВЧ-датчик.

Литература

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Хайкин С. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
2. Викторов В.А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
3. Радиоволновой измеритель параметров вибраций / Д.Ф. Руденко, А.И. Волковец, А.В. Гусинский [и др.] // 15-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» : материалы конференции, (Севастополь, 12 – 16 сентября 2005 г.). – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 829-830.
4. Радиоволновая интерферометрия смещений грудной клетки человека, связанных с дыханием и сердцебиением / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов [и др.] // 15-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» : материалы конференции, (Севастополь, 12 – 16 сентября 2005 г.). – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 900-901.
5. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннел. – М. : Мир, 1989. – 336 с.
6. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах / Тишер Ф. – М. : Физматлит, 1963. – 364 с.
7. Дробахин О.О. Применение нейронных сетей для калибровки датчиков мощности в зондовых измерителях на СВЧ / О.О. Дробахин, А.В. Доронин, Д.Ю. Салтыков // 5-я Международная научно-практическая конференция «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» : материалы конференции, (Днепропетровск, 14 – 16 ноября 2007 г.). – Днепропетровск : ДНУ, 2007. – С. 54-55.
8. Steve C. Cripps VNA Tales / C. Steve // IEEE microwave magazine. – 2007. – Vol. 8, № 5 (October). – P. 28-44.
9. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – [2-е изд.]. – М. : Наука, 1979. – 288 с.

О.О. Дробахін, О.В. Доронін

Застосування нейромережних технологій для підвищення достовірності оцінок параметрів переміщення неплоских елементів конструкцій

З метою отримання достовірних значень параметрів переміщення об’єктів з неплоскою поверхнею за допомогою інтерференційного НВЧ-методу на основі тризондових вимірювачів були використані нейромережні технології. На базі даного методу була поставлена серія реальних експериментів. Квадратичність характеристик детекторів забезпечувалася застосуванням калібрування з використанням розробленої математичної моделі нейронної мережі. Застосування інтерференційного методу НВЧ-вимірювань в поєднанні з нейромережними технологіями дозволило визначати параметри переміщення контрольованого об’єкта з високою точністю.

O.O. Drobakhin, A.V. Doronin

The Application of Neural Network Technologies to Increase the Reliability of Evaluation of Displacement Parameters of Non-planar Constructive Elements

With the purpose to obtain the reliable values of parameters of moving objects with an non-planar surface by an interference microwave method on the basis of three-probes measuring devices the neural network technologies were used. On the base of this method the series of the real experiments were put. Quadratic detectors descriptions were provided by using calibration with the developed neuron network mathematical model. Application of interference method of the microwave measuring in combination with neural network technologies allowed to determine the displacement of controlled object parameters with high exactness.

Статья поступила в редакцию 01.06.2009.